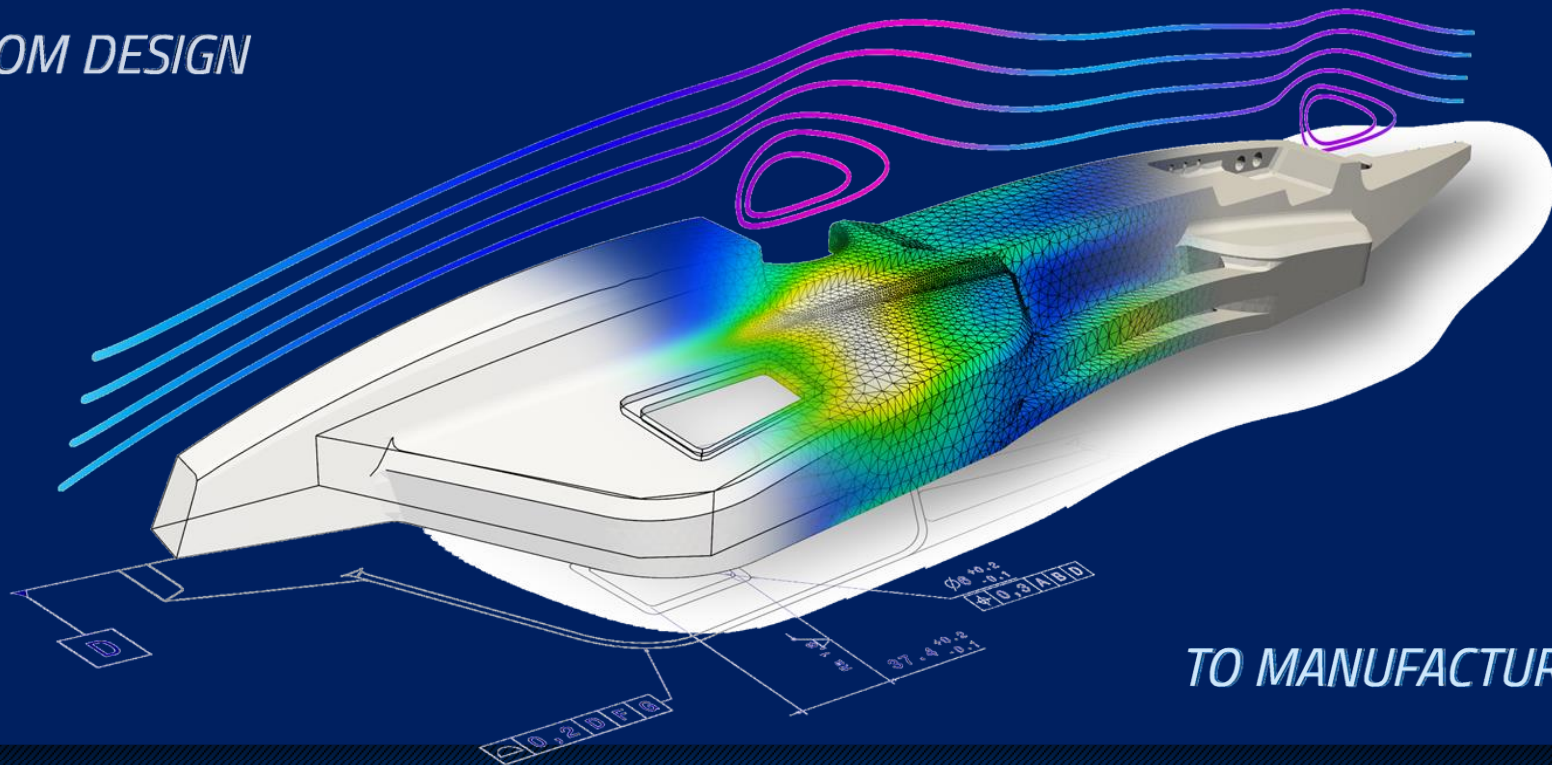


FROM DESIGN



TO MANUFACTURING

www.gdtech.eu

GDTEch S.A. | 7 Avenue de l'expansion, BE-4432 ALLEUR | Tél. : +32 4 367 87 11 | Fax : +32 4 376 68 22

GDTEch France S.A.S. | Site Aéropolis, F-64510 BORDES | Tél. : +33 (0) 5 59 82 35 35 | Fax : +33 (0) 5 59 02 08 67

F034 Version 10- Ce document est la propriété du Groupe GDTEch - Il ne peut être communiqué à des tiers ni reproduit sans autorisation écrite (loi du 11 mars 1957)



Référence GDTech :
Référence Client :
Titre de l'Etude :

SOLAR PERFORM : Calculs METAFOR

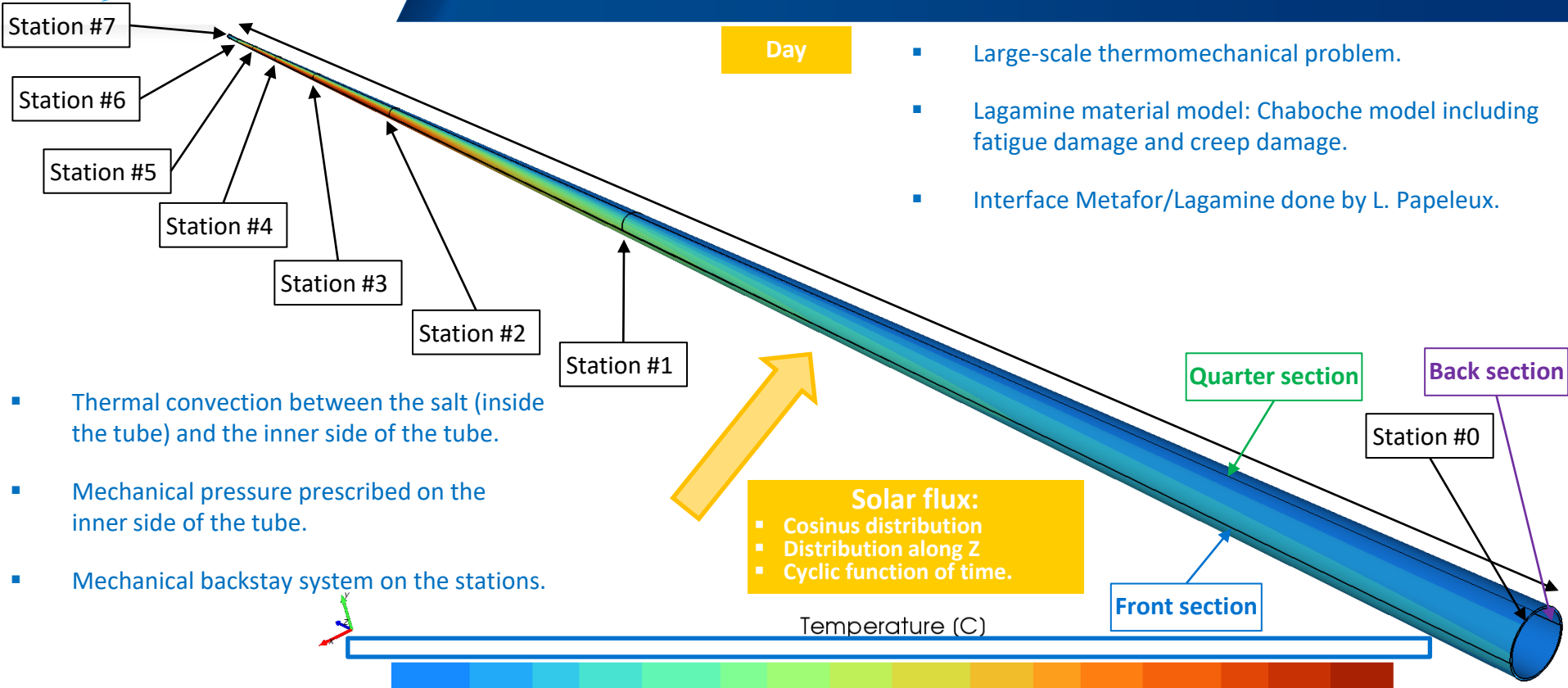
REDACTION	VERIFICATION
Nom : Yannick Crutzen	Nom : Anne Mawet
Date : 14 Décembre 2020	Date :
Signature :	Signature :

Absorbeurs thermiques du récepteur solaire :

- Tour de 200m → difficilement accessible.
- Sel fondu à 700 °C le jour (très corrosif!).
- Cyclage thermique.
- Durée de vie à garantir : 25 ans.



<http://www.cmigroupe.com/fr/cmi-solar>
<https://www.polemecatech.be/fr/projets/solar-perform/>



John Cockerill's request: compute the total damage experienced for the targeted lifetime (20 000 cycles).

- Validation des résultats METAFOR sur des cas-tests simplifiés de petite taille :
 - Mono-élément.
 - Tube fin.

- Cas-tests du tube de grande taille :
 - Description du modèle.

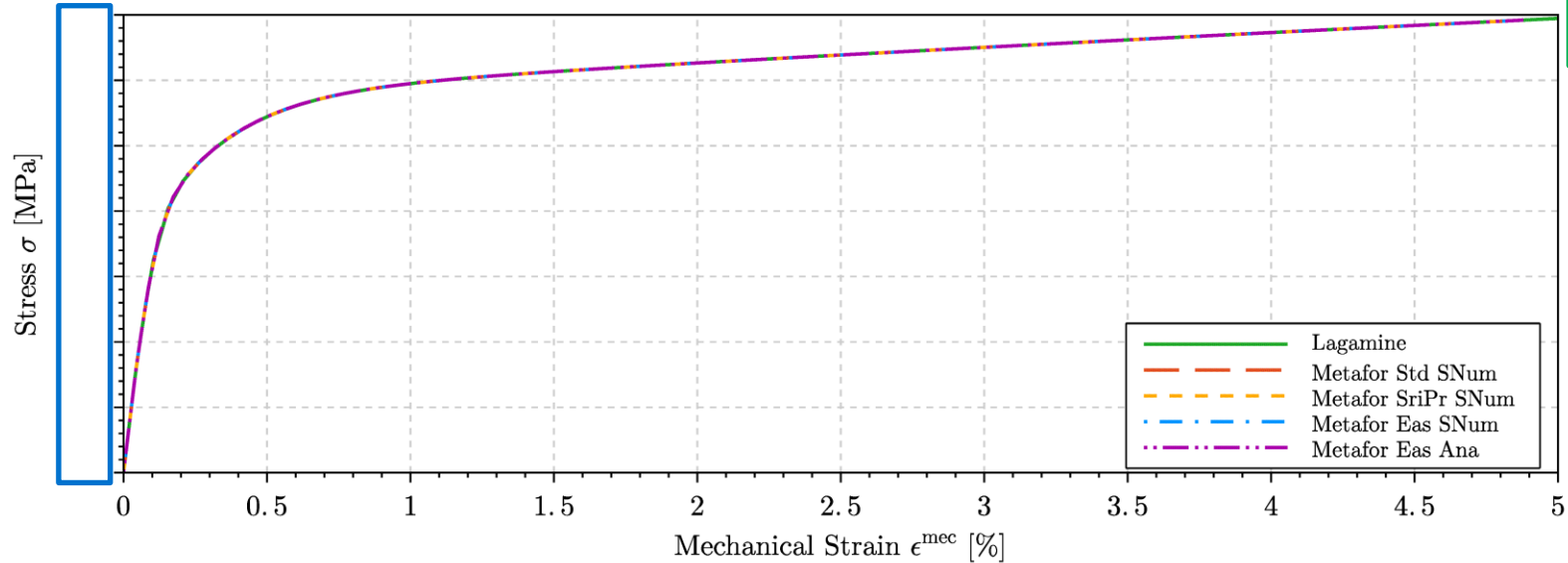


- Cas de petite taille : Validation de cas-tests sur mono-élément -

1. Essai de traction
2. Cycles isothermiques
3. Cycles anisothermiques

- Loi matériau : Alloy230.larrh2AnisoTDamage
- Paramètres matériaux : paramètres Lagamine fournis par Hélène Morch (18/09/2020).
- Température imposée = 600°C.

Temps	Déformation ϵ_{11}
0.0	0%
10.0	5%



METAFOR
correlated



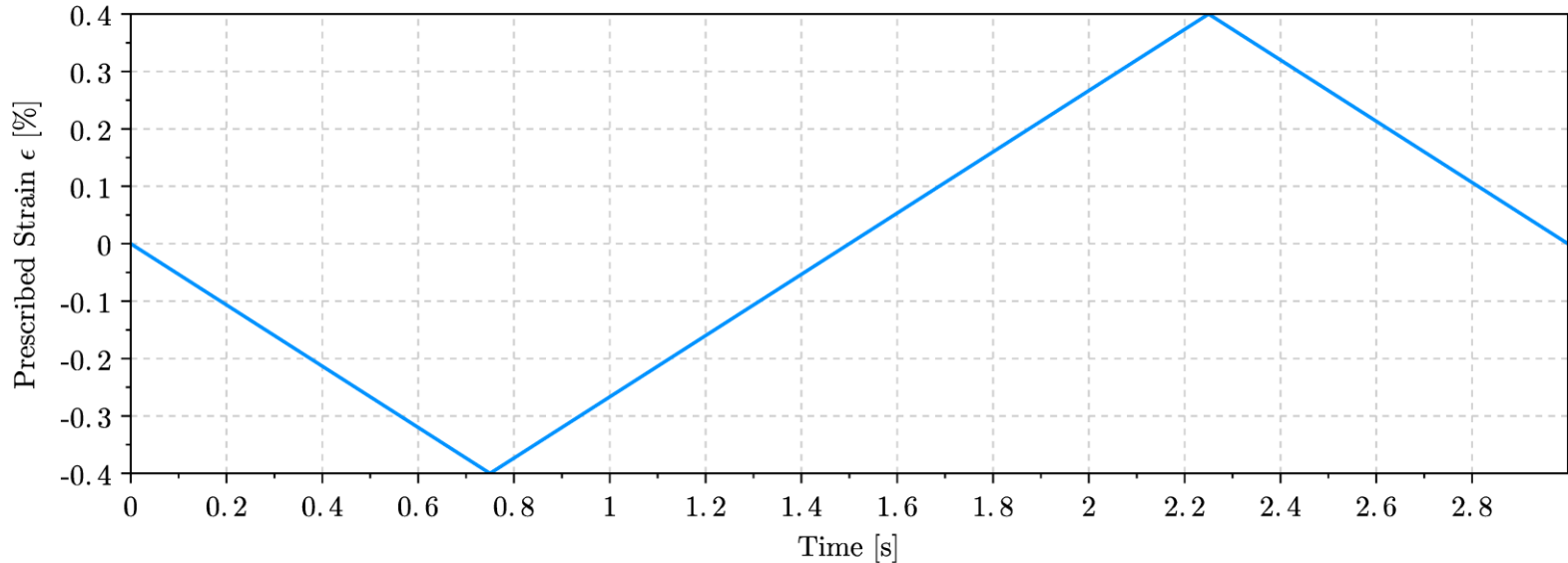
✓ **Excellente corrélation de la courbe contrainte-déformation.**



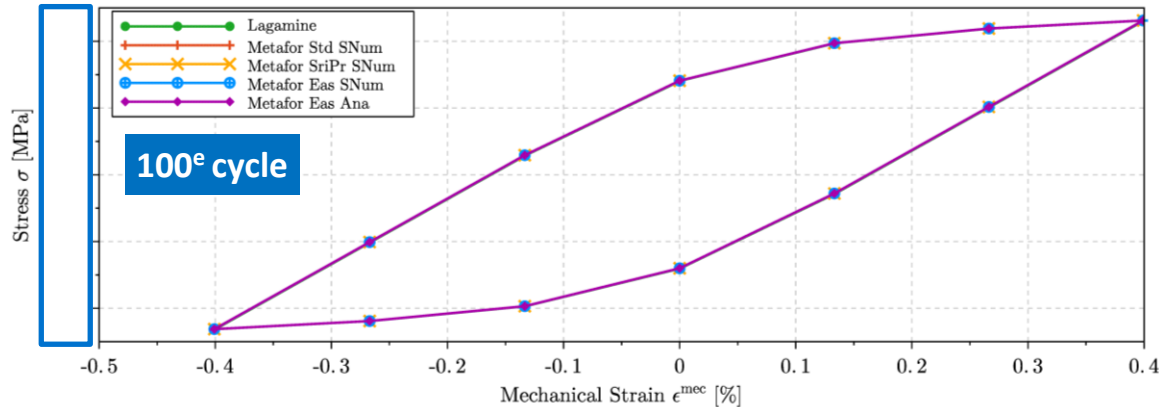
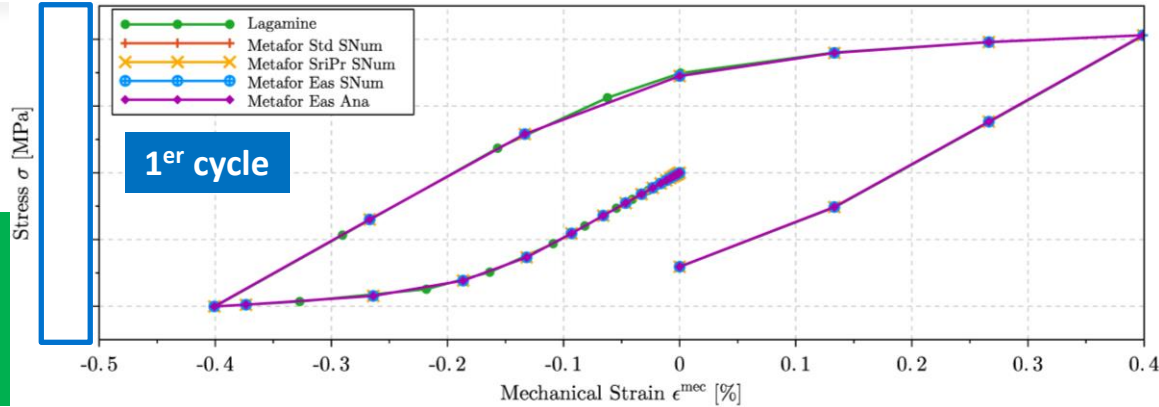
- Cas de petite taille : Validation de cas-tests sur mono-élément -

1. Essai de traction
2. **Cycles isothermiques**
3. Cycles anisothermiques

- Température imposée = 24°C.
- Période = 3.0 s
- Chargement cyclique triangulaire.
- Amplitude de déformation 0.8% avec $R = -1$

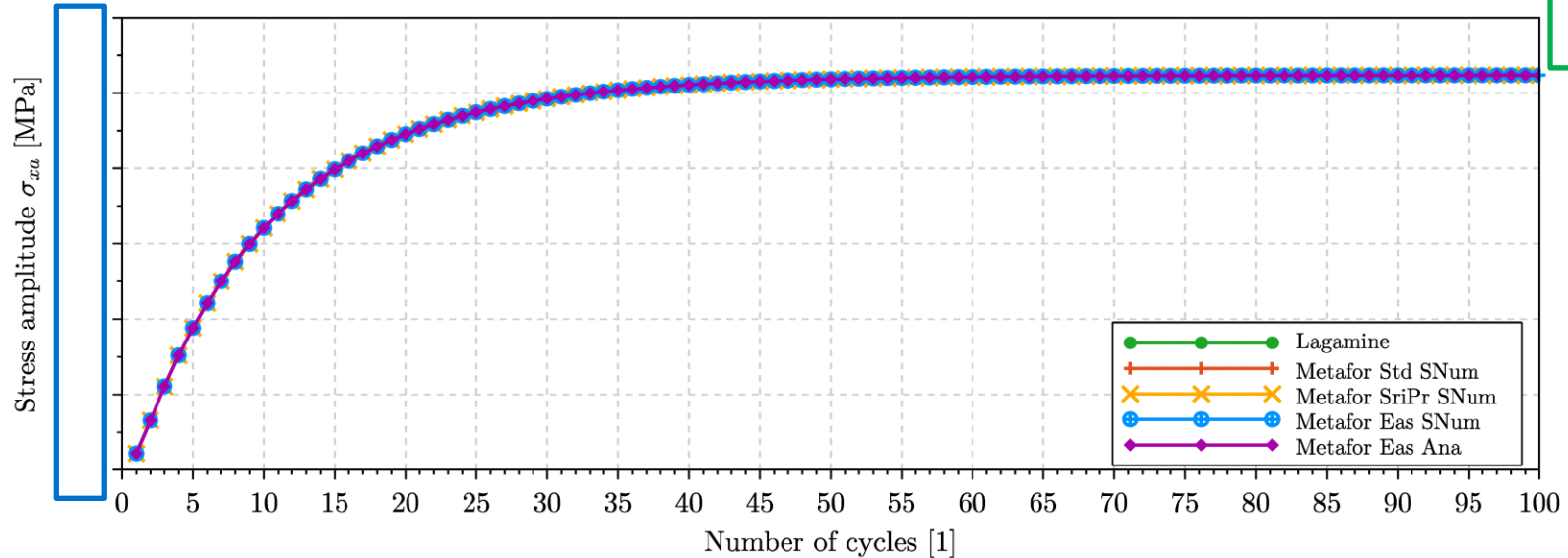


✓ Excellente corrélation de la courbe contrainte-déformation sur le 1^{er} cycle et le dernier cycle.



METAFOR
correlated

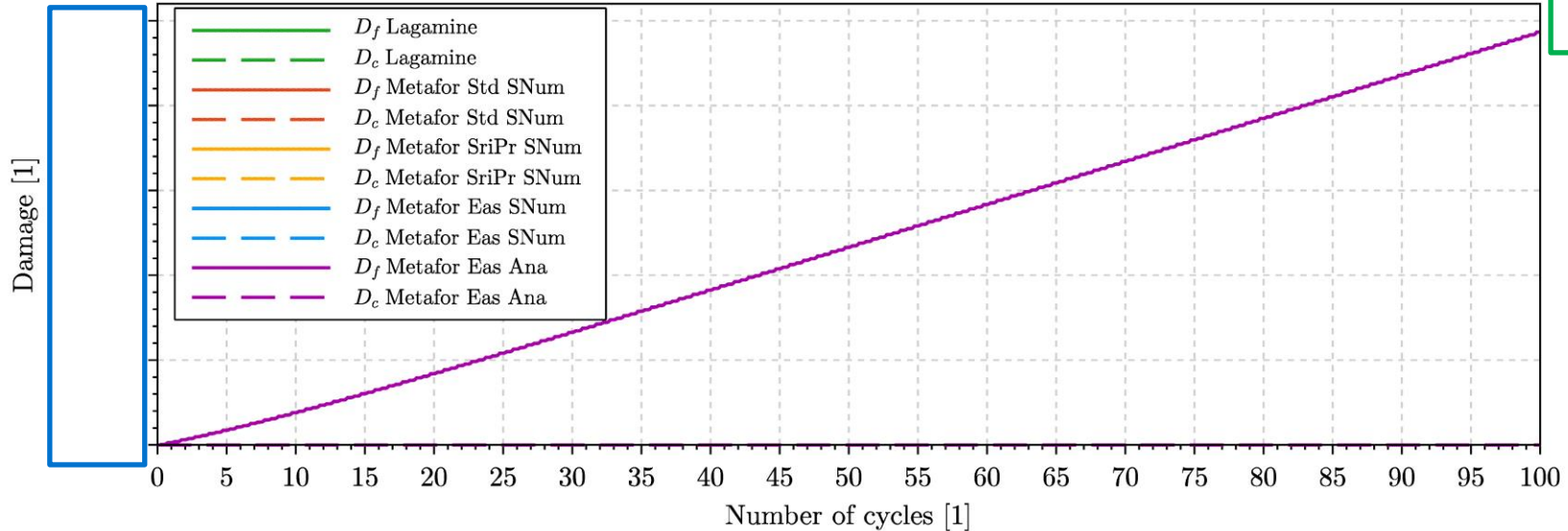




METAFOR
correlated



✓ **Excellente corrélation de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles.**



METAFOR
correlated



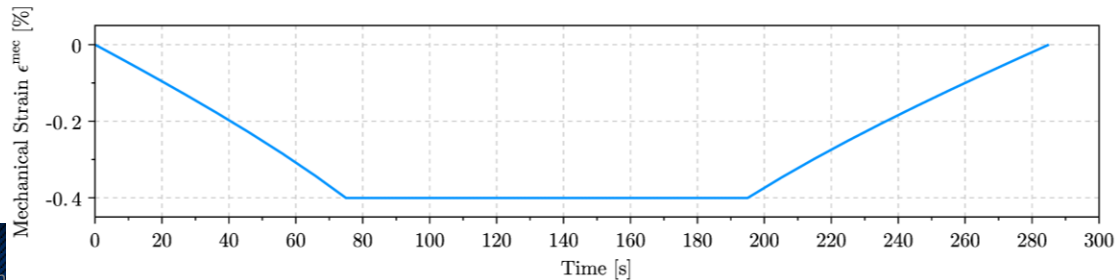
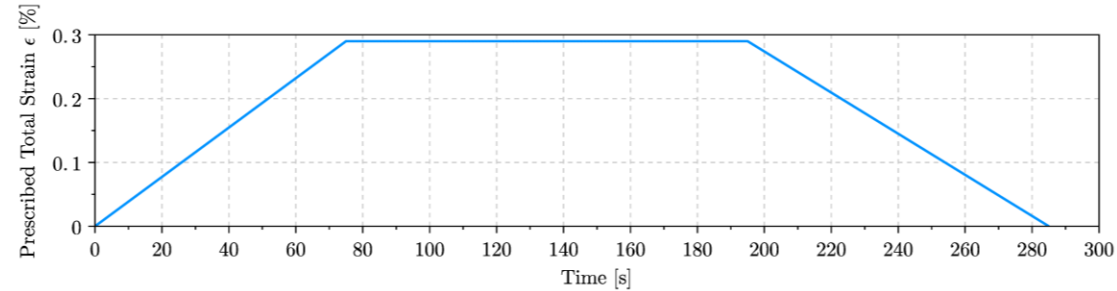
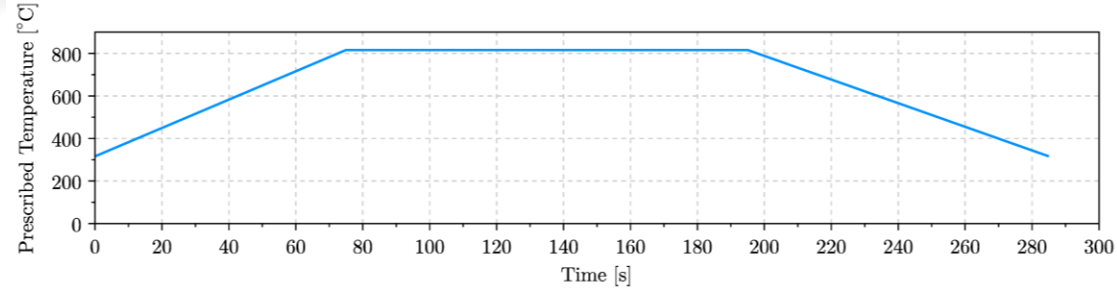
✓ **Excellente corrélation de l'endommagement de fluage et de fatigue.**



- Cas de petite taille : Validation de cas-tests sur mono-élément -

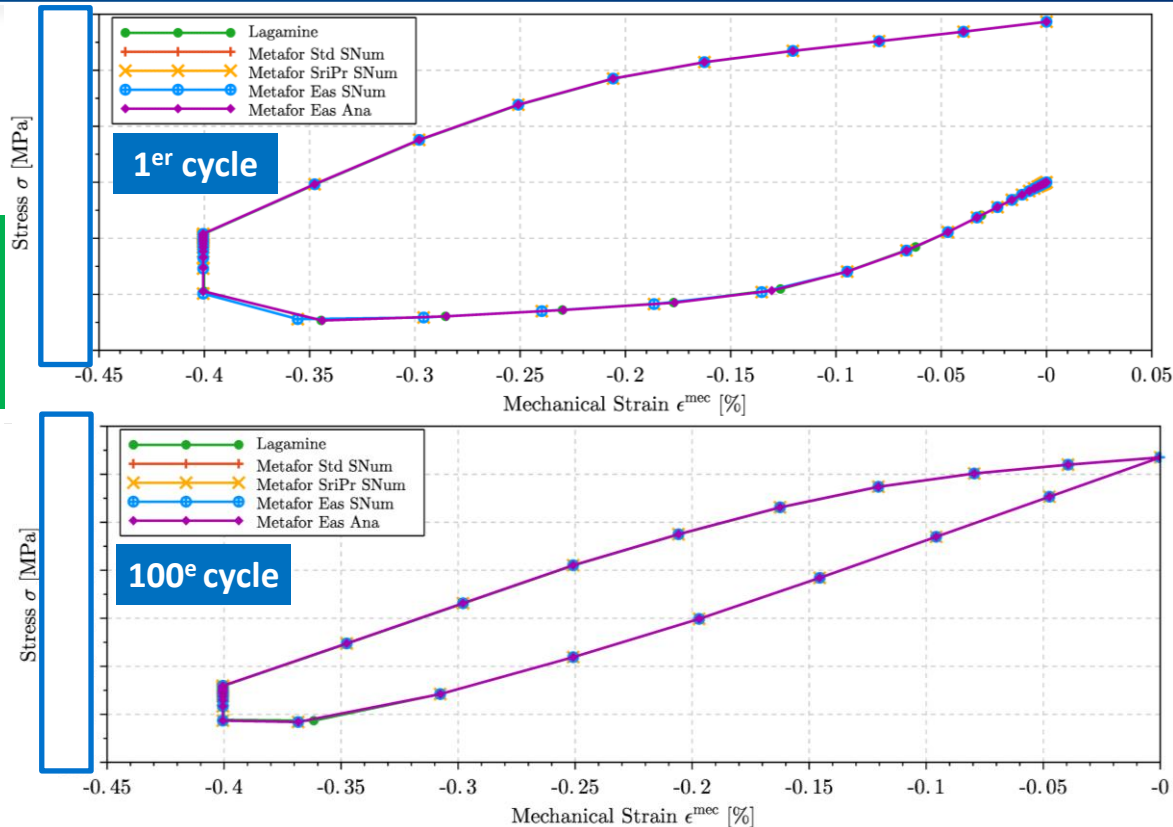
1. Essai de traction
2. Cycles isothermiques
- 3. Cycles anisothermiques**

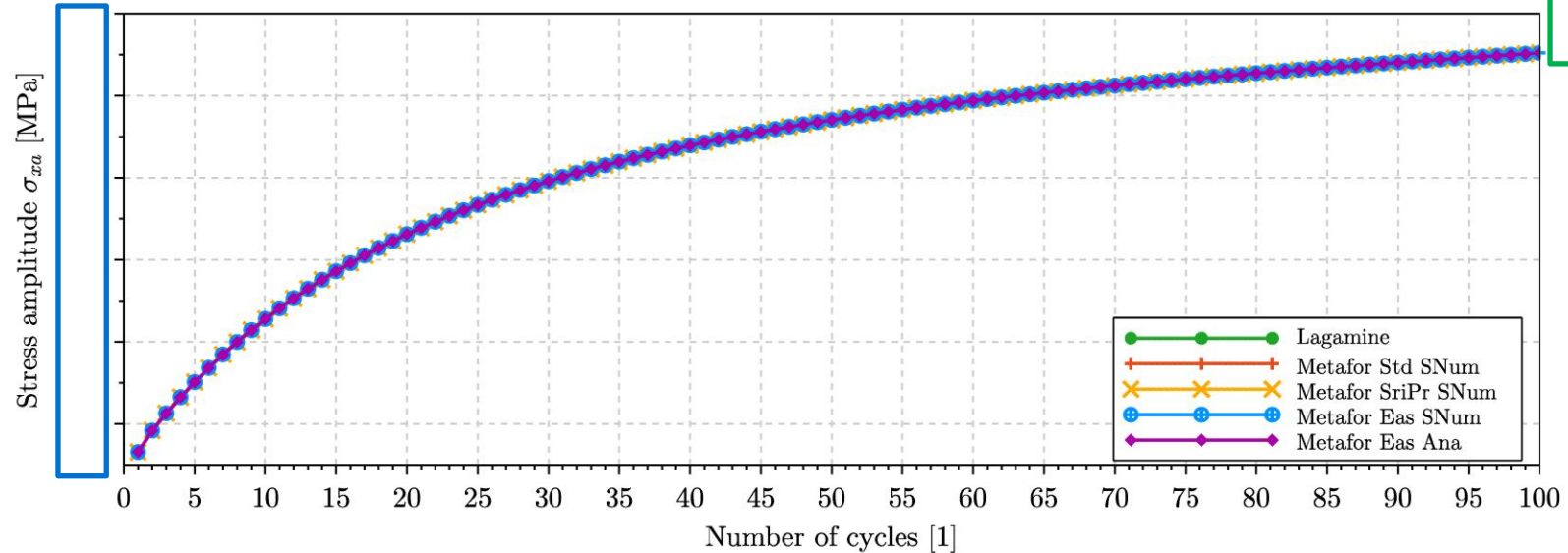
- Température = 316°C – 816°C.
- Chargement cyclique avec temps de maintien en compression.
- Déformation imposée :
 $\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{mec}} + \epsilon_{\text{th}} = 0.29\%$
- Période = 285.0 s
- Amplitude de déformation
 - 0.4% avec $R = 0$.



✓ Excellente corrélation de la courbe contrainte-déformation sur le 1^{er} cycle et le dernier cycle.

METAFOR correlated

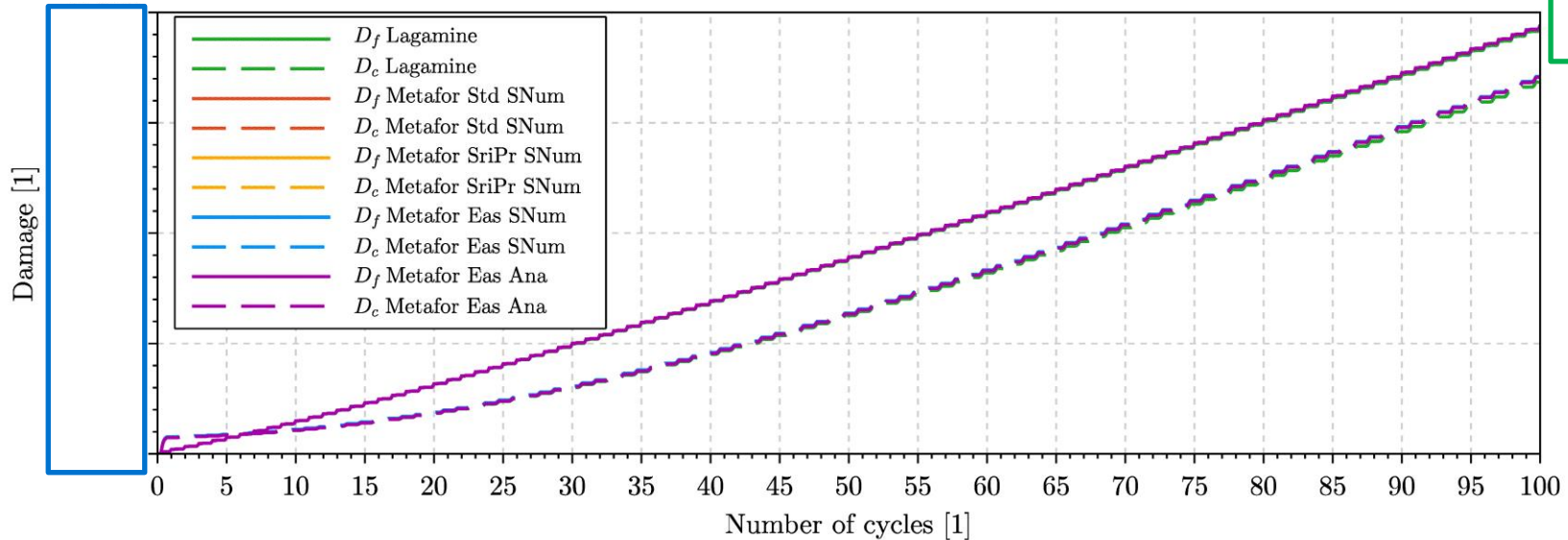




**METAFOR
correlated**



✓ **Excellente corrélation de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles.**



METAFOR
correlated



✓ **Excellente corrélation de l'endommagement de fluage et de fatigue.**



- Conclusions partielles de la validation des cas-tests sur mono-élément -

- ✓ **Excellente corrélation** des résultats entre Lagamine et METAFOR :
 - ✓ Courbe contrainte-déformation.
 - ✓ Amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles
 - ✓ Endommagement de fluage et de fatigue.
- ✓ **Formulations d'éléments finis METAFOR :**
 - ✓ Std SNum
 - ✓ SriPr SNum
 - ✓ Eas Snum
 - ✓ Eas Ana
- ✓ **Cas-tests sur mono-élément seront intégrés dans la batterie de cas-tests METAFOR automatisée pour s'assurer de la non-régression :**
 - ✓ Comparaison de différentes grandeurs pertinentes entre METAFOR et résultats Lagamine de référence.
 - ✓ Post-traitement automatique des résultats.

✓ **Résultats METAFOR sont validés p/r résultats Lagamine.**



- Cas de petite taille : Validation de cas-tests sur tube fin-

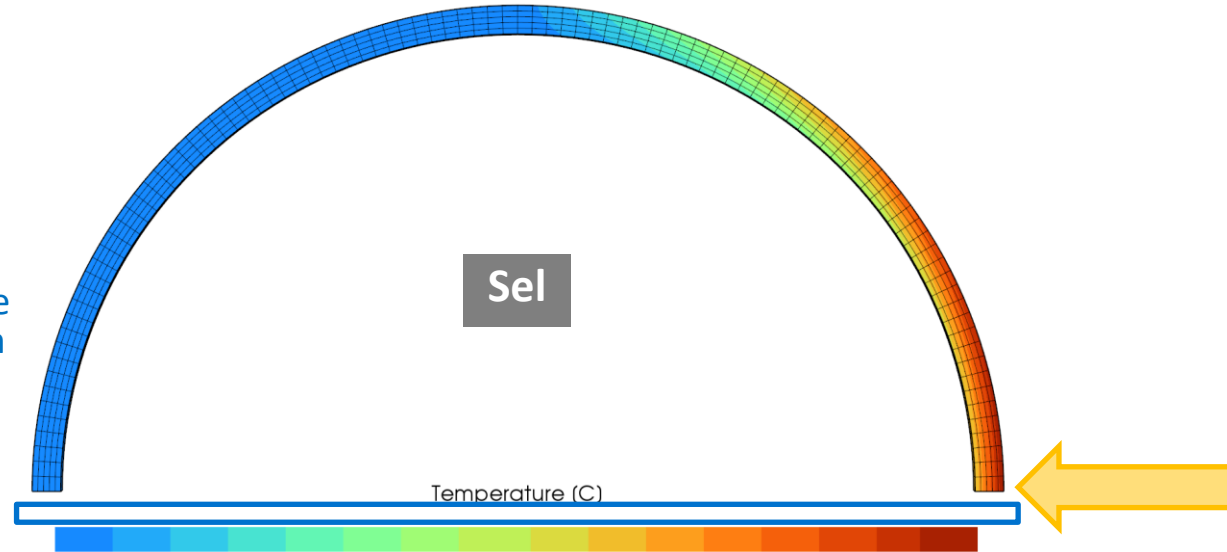


- Cas de petite taille : Conditions aux limites -

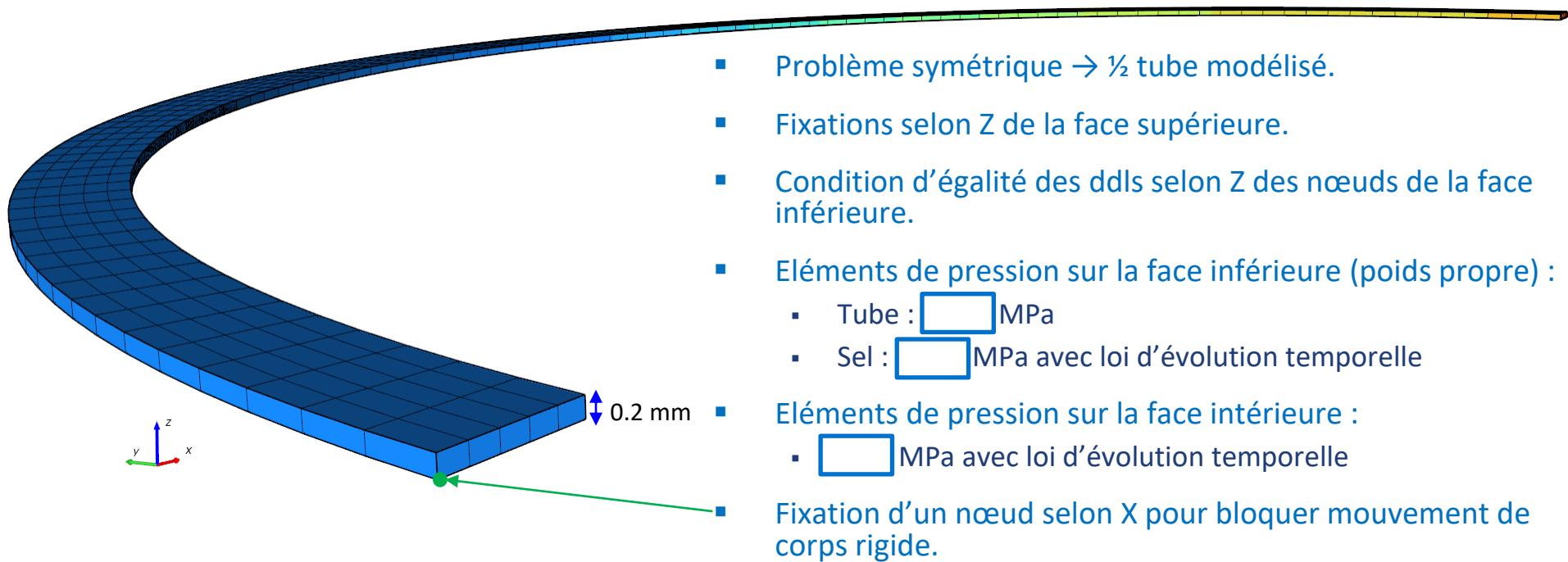
1. Conditions aux limites thermiques
2. Conditions aux limites mécaniques

Jour

- Problème symétrique → $\frac{1}{2}$ tube modélisé.
- Flux solaire : distribution cosinusoidale et temporelle sur la demi-face extérieure.
- Convection entre le sel et la face intérieure du tube avec fonction d'évolution temporelle de la température du sel.
- Température initiale imposée : $-6,9^{\circ}\text{C}$.



Flux solaire :
Distribution cosinus selon θ



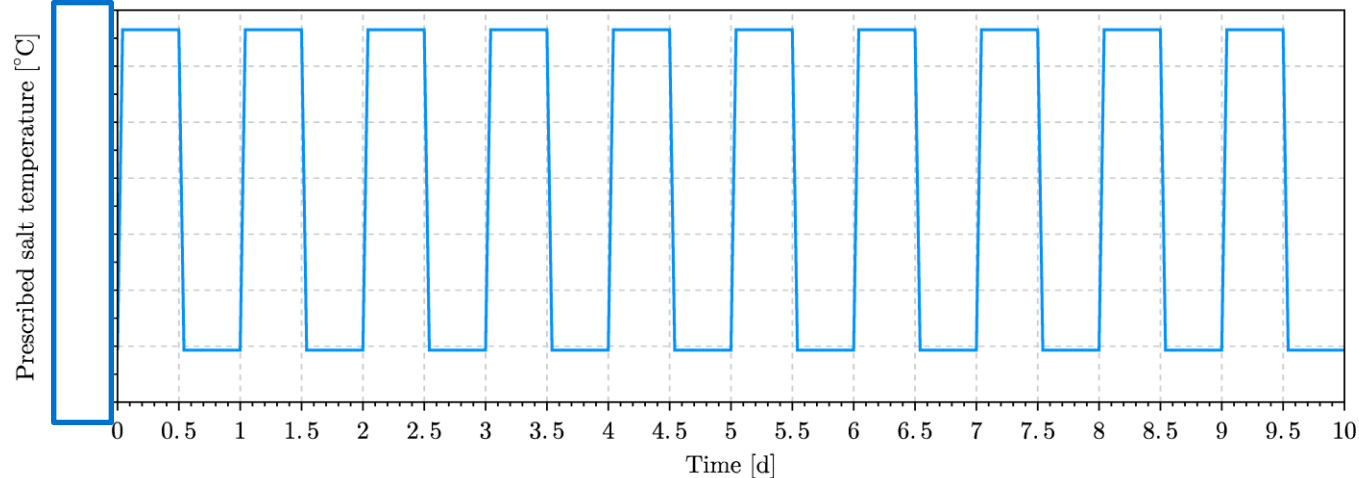
- Problème symétrique → ½ tube modélisé.
- Fixations selon Z de la face supérieure.
- Condition d'égalité des ddl selon Z des nœuds de la face inférieure.
- Éléments de pression sur la face inférieure (poids propre) :
 - Tube : MPa
 - Sel : MPa avec loi d'évolution temporelle
- Éléments de pression sur la face intérieure :
 - MPa avec loi d'évolution temporelle
- Fixation d'un nœud selon X pour bloquer mouvement de corps rigide.
- Conditions aux limites de symétrie : Fixations selon Y des 2 faces de coupe du tube.



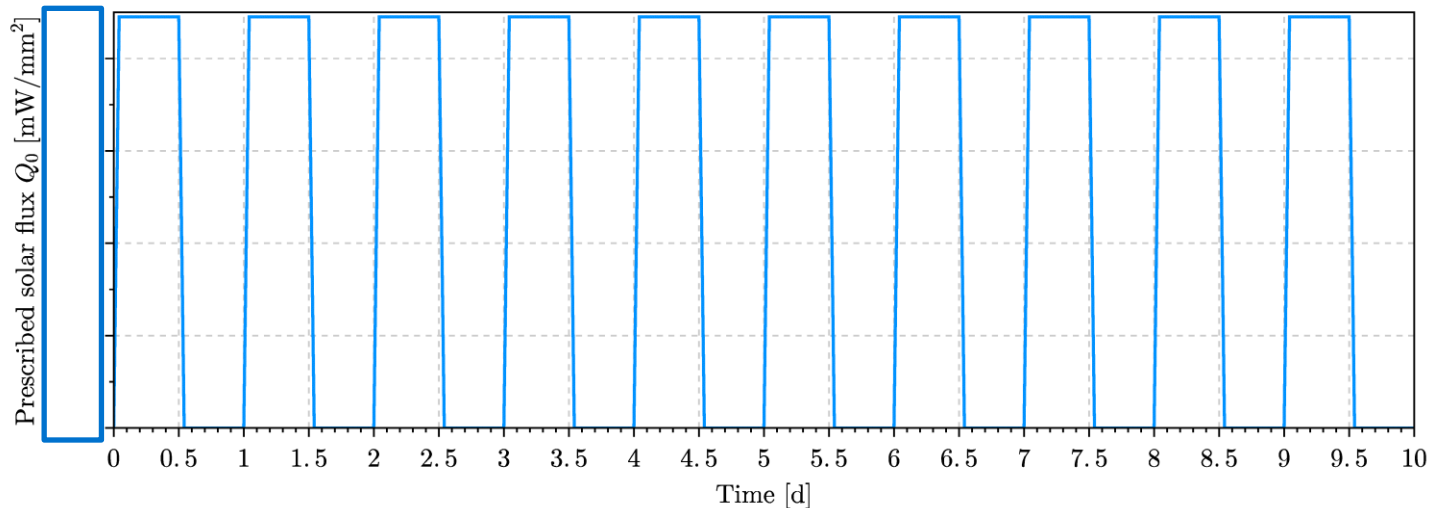
- Cas de petite taille : Fonctions d'évolution du cas simplifié #1 -

- Convection thermique entre le sel et la face intérieure du tube :

- Coefficient de convection :
- Fonction d'évolution temporelle de la température du sel :
 - durant la nuit.
 - durant le jour.

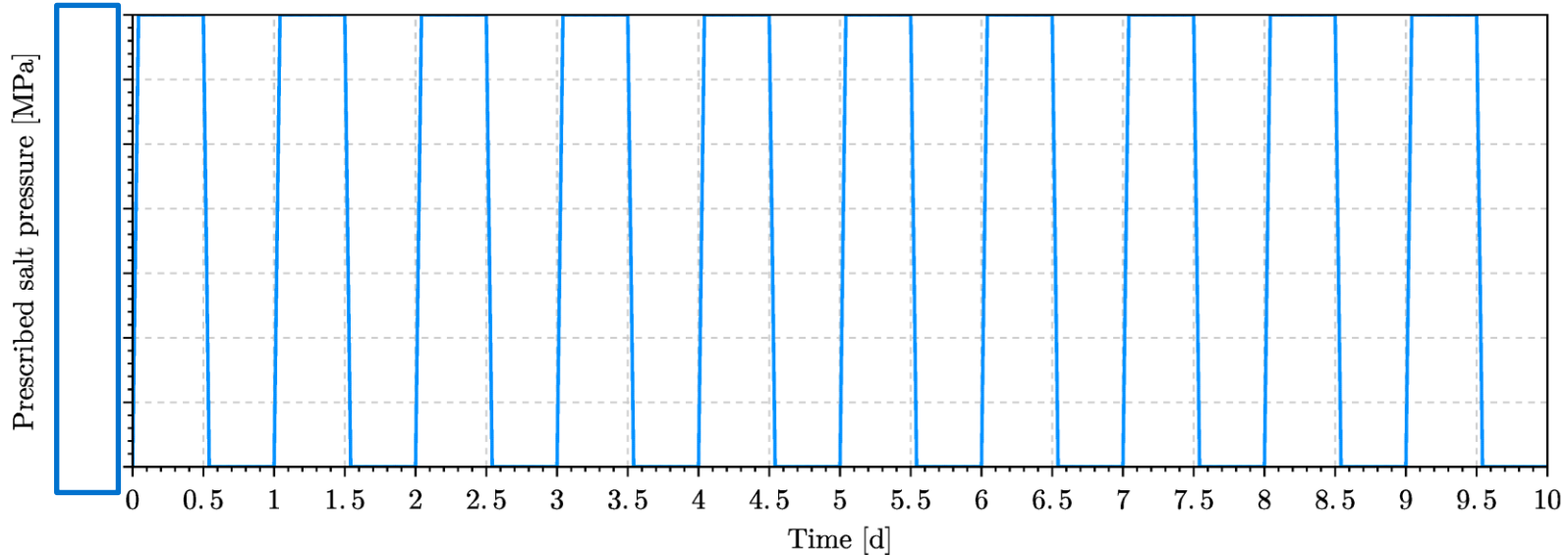


- Flux solaire absorbé :
 - Distribution cosinus.
 - durant le jour pour $\theta = 0$.
 - Fonction d'évolution temporelle pour $\theta = 0$:



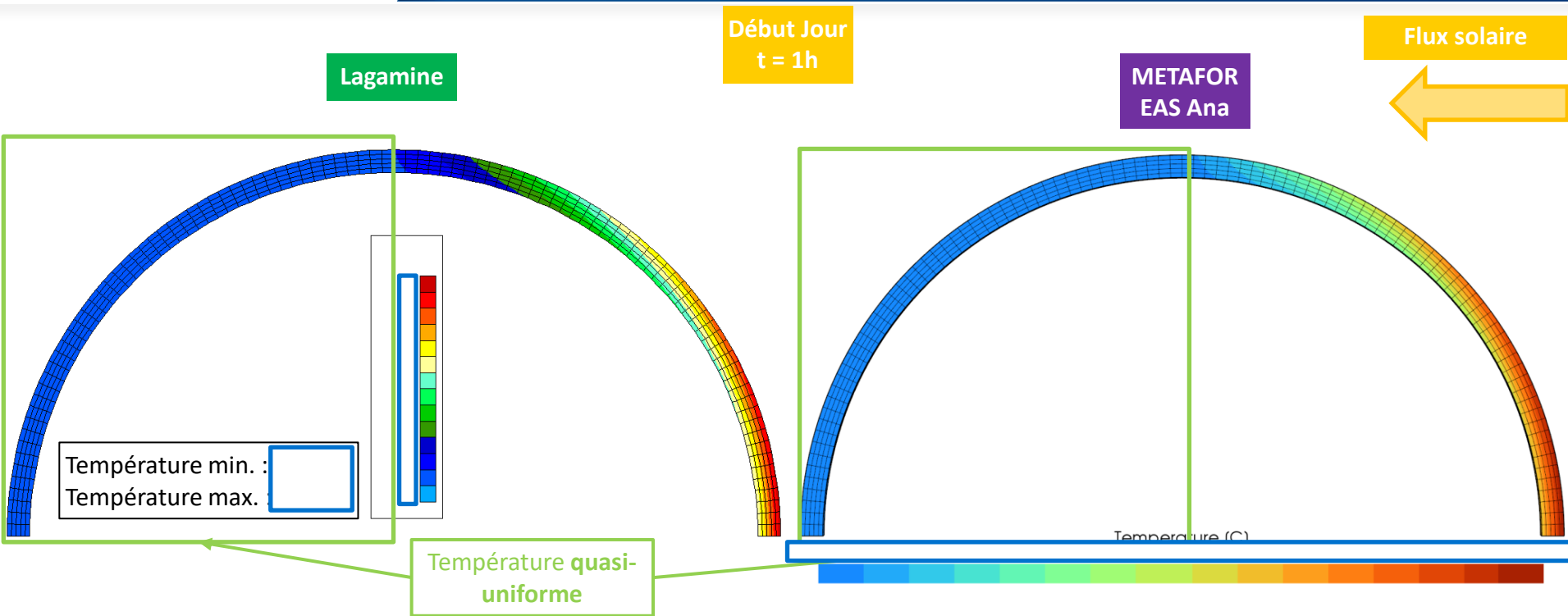
- Pression du sel sur la paroi intérieure du tube :

- durant le jour.
- Fonction d'évolution temporelle :

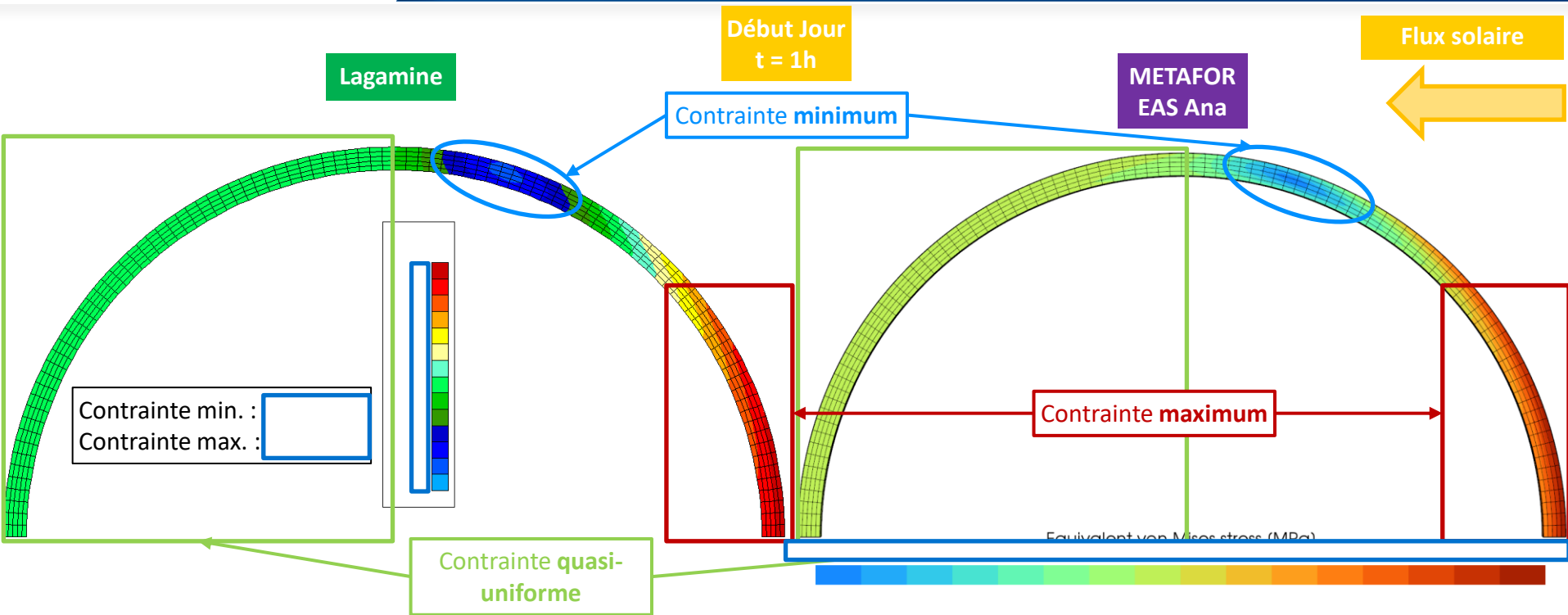




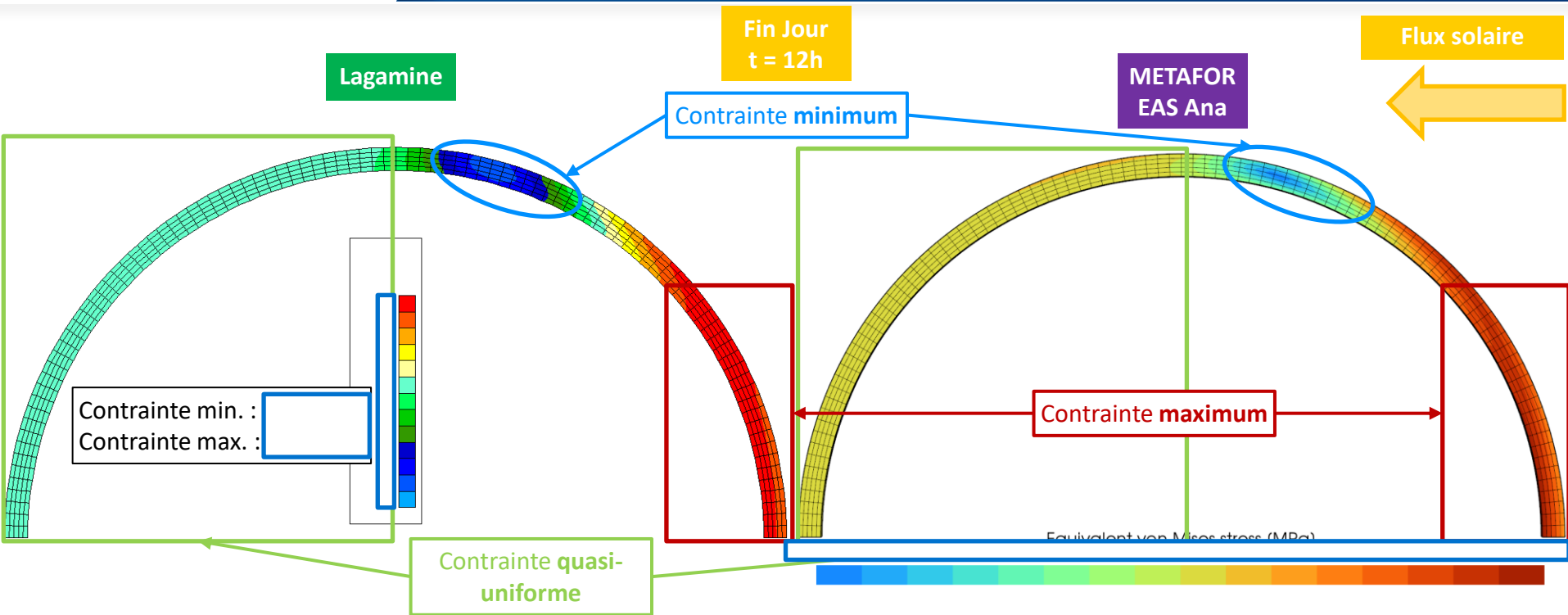
- Cas de petite taille : Résultats du cas simplifié #1 -



✓ Très bonne corrélation du champ de température.



✓ Bonne corrélation du champ de contrainte équivalente de von Mises.



✓ Bonne corrélation du champ de contrainte équivalente de von Mises.



- Conclusions partielles des cas-tests simplifiés du tube -

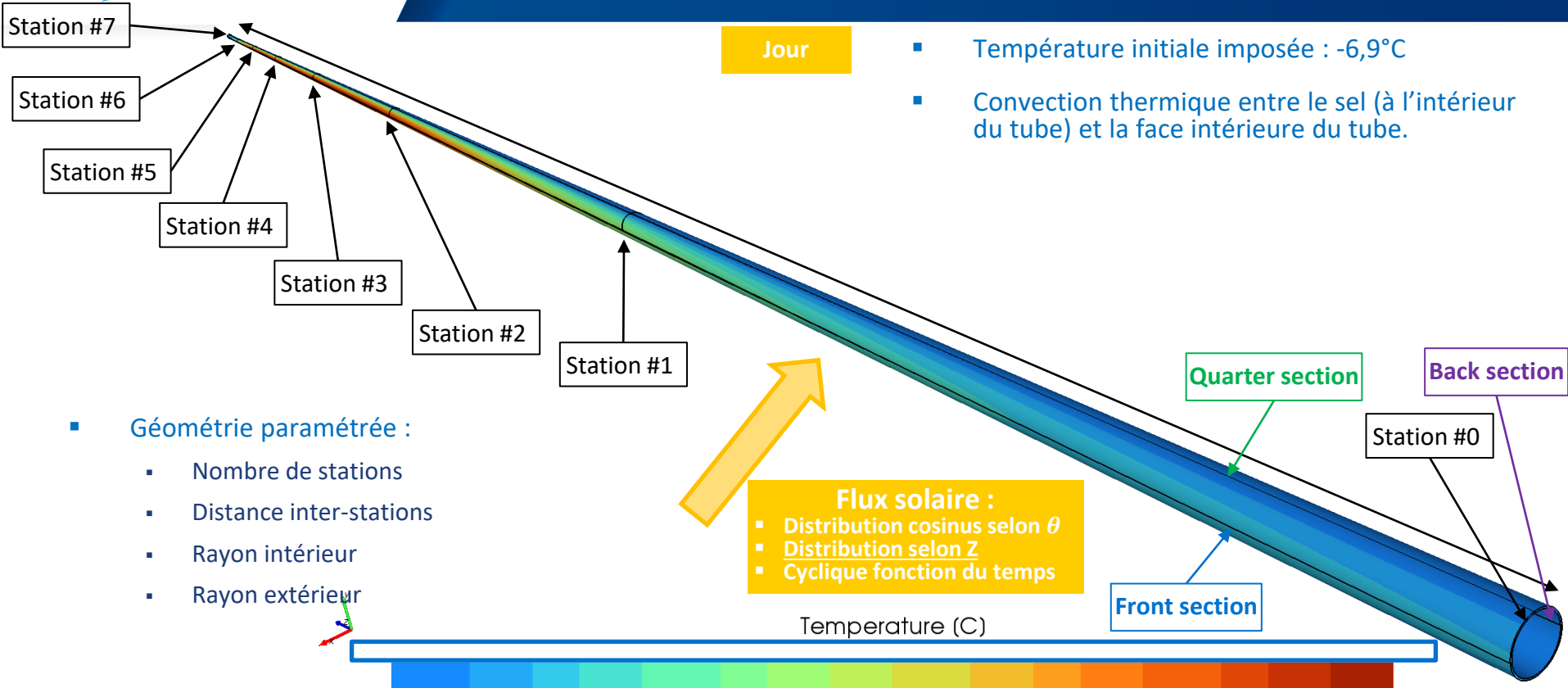
- ✓ **Très bonne corrélation** des résultats entre Lagamine et METAFOR, en particulier les phases de jour.
- ✓ **Meilleure corrélation** des résultats avec les éléments **EAS** (en comparaison des éléments Std et SriPr).
- ✓ **Matrice de raideur tangente analytique** (EAS) nettement **moins coûteuse en CPU** par rapport à matrice de raideur tangente semi-numérique.
- ✓ Cas-tests (Eas Ana) seront intégrés dans la **batterie de cas-tests METAFOR** automatisée pour s'assurer de la non-régression :
 - ✓ Comparaison de différentes grandeurs pertinentes entre METAFOR et résultats Lagamine de référence.
 - ✓ Post-traitement des résultats.

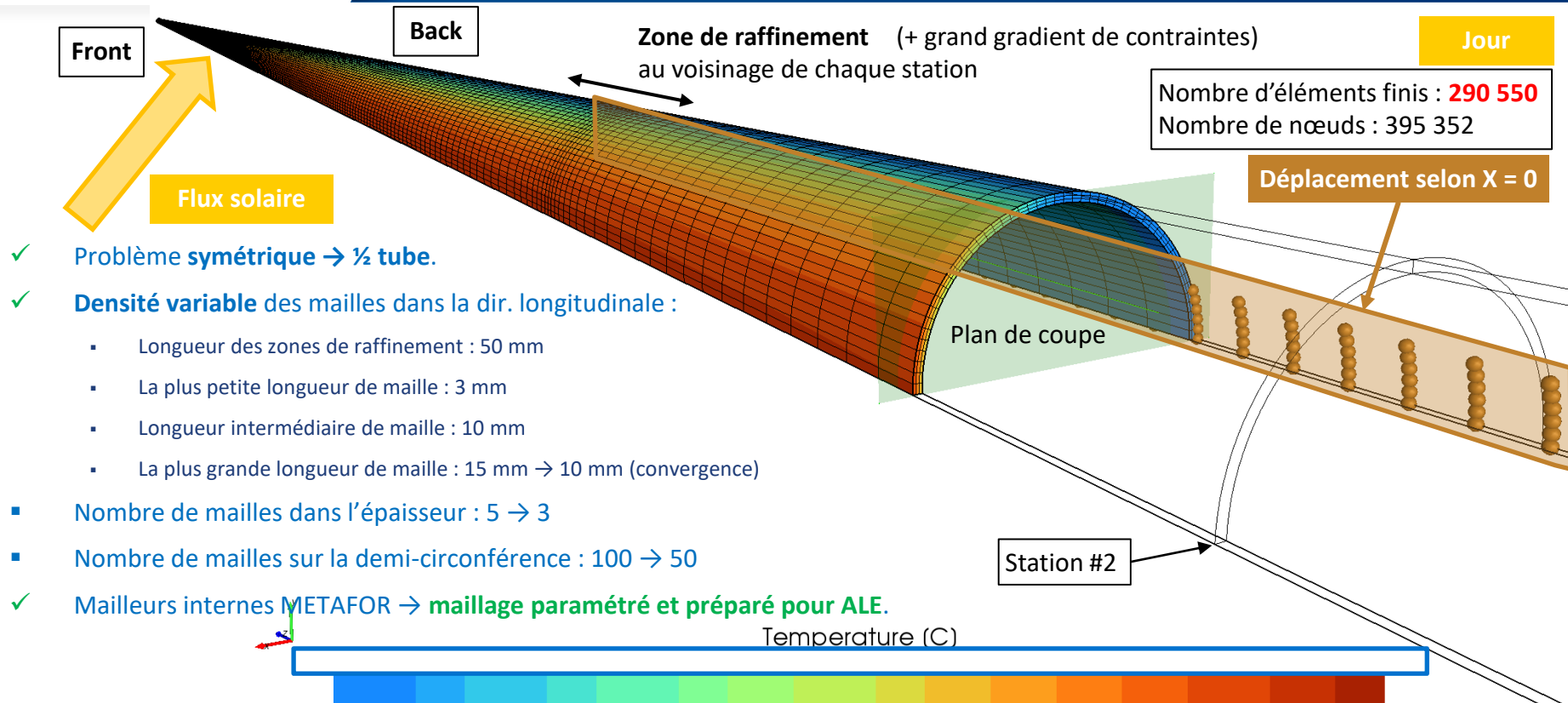
✓ **Résultats METAFOR sont validés p/r résultats Lagamine.**



- Cas de grande taille : Cas #1 -

1. Description du problème





- ✓ Problème **symétrique** → ½ tube.
- ✓ **Densité variable** des mailles dans la dir. longitudinale :
 - Longueur des zones de raffinement : 50 mm
 - La plus petite longueur de maille : 3 mm
 - Longueur intermédiaire de maille : 10 mm
 - La plus grande longueur de maille : 15 mm → 10 mm (convergence)
- Nombre de mailles dans l'épaisseur : 5 → 3
- Nombre de mailles sur la demi-circonférence : 100 → 50
- ✓ Maillages internes METAFOR → **maillage paramétré et préparé pour ALE.**

- ✓ Maîtrise acceptable de la taille du modèle dans un cadre implicite (coûts CPU et mémoire) :
 - ✓ Problème symétrique $\rightarrow \frac{1}{2}$ tube.
 - ✓ Déraffinement du maillage selon Z dans les régions inter-stations où de faibles gradients de contraintes (et de température) sont attendus.
- ✓ Nombre minimum de pas de temps par phase : 40 \rightarrow 20 (plus petit nombre de grands pas de temps grâce à l'intégrateur implicite).
- ✓ Éléments finis EAS.
- ✓ Matrice de raideur tangente analytique.
- ✓ Calcul parallèle.

✓ **Maîtrise acceptable des coûts CPU et mémoire pour 100 cycles.**

- **But John Cockerill's request:** compute the **total damage** resulting from the thermomechanical loading experienced during the **entire targeted lifetime (20 000 cycles)**.

✖ Expected CPU time for simulating 20 000 cycles: 6 years !

- Tracks for reaching 20 000 cycles:
 - Tuning model parameters:
 - Pushing further the reduction of the size of the model:
 - Limited length of the tube: critical section could be identified after a limited number of cycles.
 - Reduction of the mesh size: number of elements in the thickness, number of elements in the half-circumference, etc.
 - Reduction of the minimum number of timesteps per stage.
 - **Improvements in Metafor (next slides).**
 - Extrapolating the damage using Hélène's postprocessor. Comparison of the results with/without extrapolation.

- Limitation: **At least one fac archive has to be saved for each stage.** Here, one cycle is defined by 4 stages.

Observations:

- At least **80 000 fac archives** should be **saved** if the total damage does not reach the critical value before the targeted lifetime, leading to more than **25 To written on the disk**, which is a totally unaffordable quantity.
- Time** for **saving fac archives** is relatively important (**14%**).
- Time** for computing the **external forces** is the predominant part (**30%**). **Why ?**

✓ Main improvements:

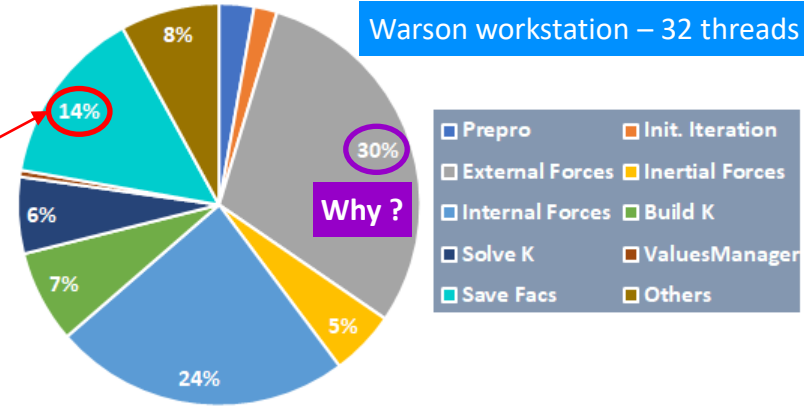
- ✓ **Limitation** on the number of saved fac archives per stage has been **removed: new stage without saving fac archive can be defined.**
- ✓ StageValuesManager has been implemented for extracting the results at the end of each stage.

Reference test case

76 320 FE – 1 cycle

Wall-clock time distribution

Warson workstation – 32 threads



- ✓ **Gain in wall-clock time without saving Facs: 14%.**
- ✓ **Better control on the data written on the disk.**

Assembly of structural force vectors and tangent stiffness matrix (MR15)

Observations:

- Assembly of **many zero elemental vectors**, especially for **thermomechanical** problems.
- Method hasForces(const StrID &typeVec) at interaction level for bypassing assembly loops of all the active interactions we know *a priori* that their elements have no force.
→ Not used for all types of interactions, such as LoadingInteraction.

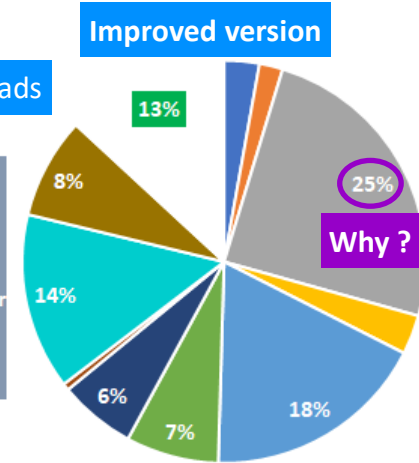
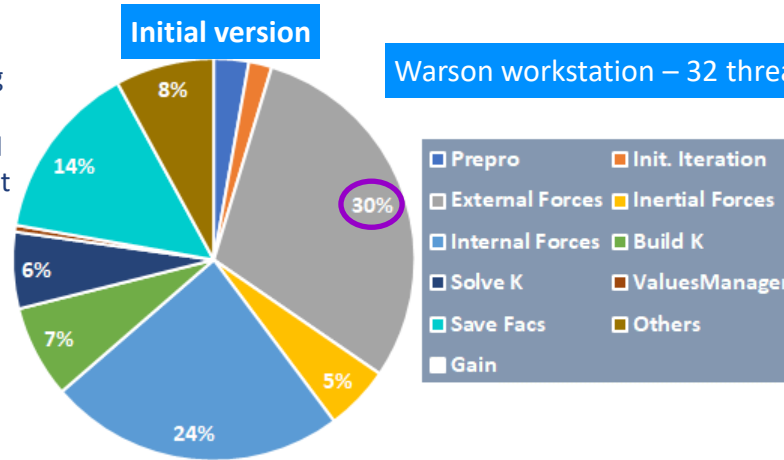
Type of element	Type of force	Type of dof
Tm/Tm2ConvectionElement	External	Thermal
Tm/Tm2FluxElement	External	Thermal
Tm/Tm2RayonnementElement	External	Thermal
TractionElement	External	Mechanical
TriangleTractionElement	External	Mechanical

Improvements:

- Extension of the mechanism for taking into account the **type of dof** (mechanical dof or thermal dof) **for all types of interactions** : hasForces(const StrID &typeVec, Field const *dofType)

✓ Distribution of the total gain (13%):

- ✓ External forces: 5%.
- ✓ Internal forces: 6%.
- ✓ Inertial forces: 2%.



✓ Extra gain in wall-clock time: 13%.

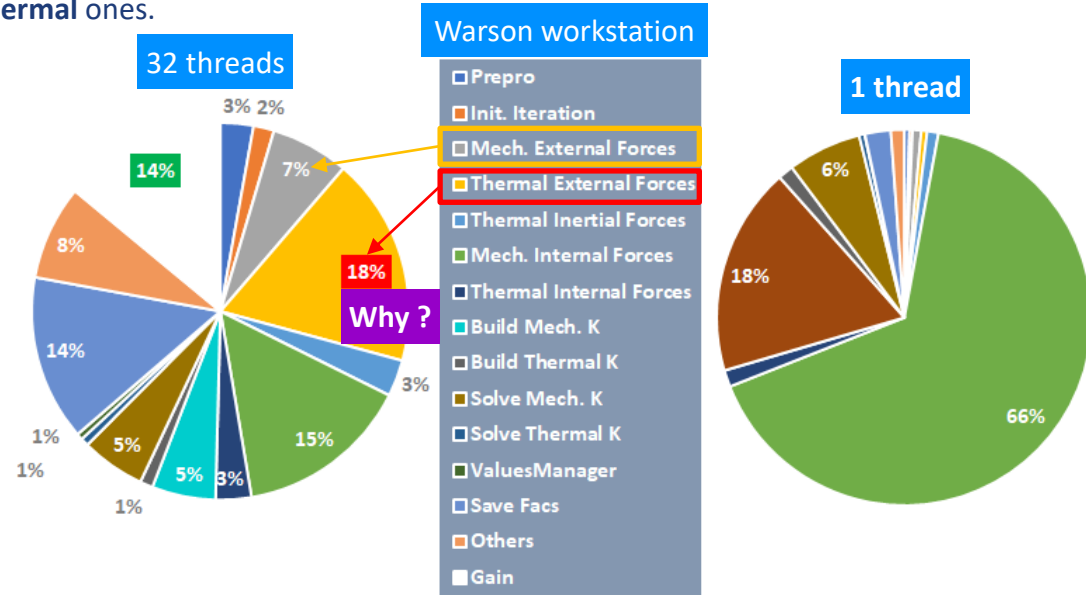
✓ Total gain in wall-clock time without saving Facs: 27%.

Improvements (cont'd):

- Extension of the method at the interaction level for the assembly of the **tangent stiffness matrix**.
- Timers** have been split in **mechanical** and **thermal** ones.

✓ Distribution of the total gain (14%):

- ✓ External forces: 5%.
- ✓ Internal forces: 6%.
- ✓ Inertial forces: 2%.
- ✓ **Tangent stiffness matrix: 1%.**

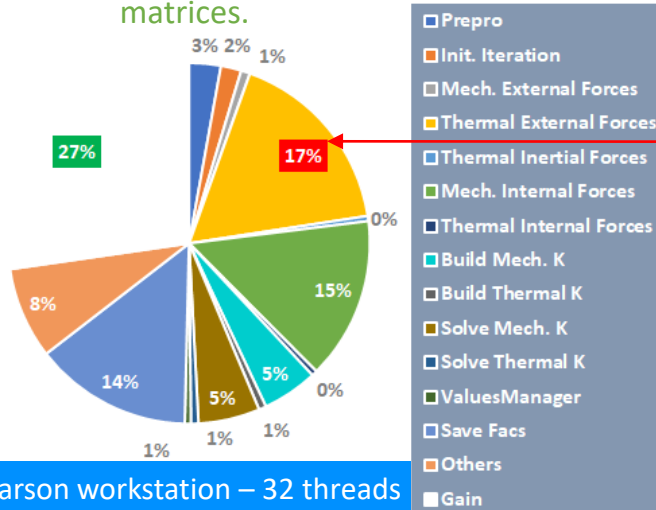


✓ Extra gain in wall-clock time: 14%.

✓ Total gain in wall-clock time without saving Facs: 28%.

Improvement of the parallel scalability of the assembly of structural vectors and matrices (MR17)

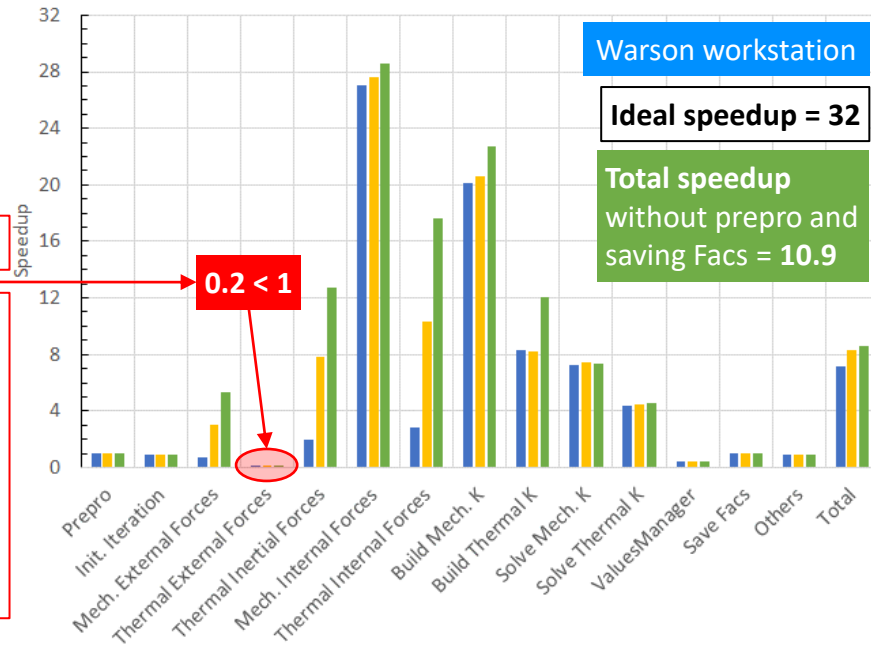
- Improvement of the **reduction operation** in **StrVector**: reduction of the critical section protected by the mutex.
- Random-access** iterators instead of **forward-access** iterators for looping on elements in the assembly of vectors and matrices.



Slower than sequential !

Cause: **Python Global Interpreter Lock (GIL)** in a home-made director for evaluating a multiparameter function (solar flux) at each GP/element/thermal iteration.

- Offi v3469 MR15 - Forward-access Iterator
- Improvement of StrVector reduction
- Improvement of StrVector reduction - Random-access Iterator

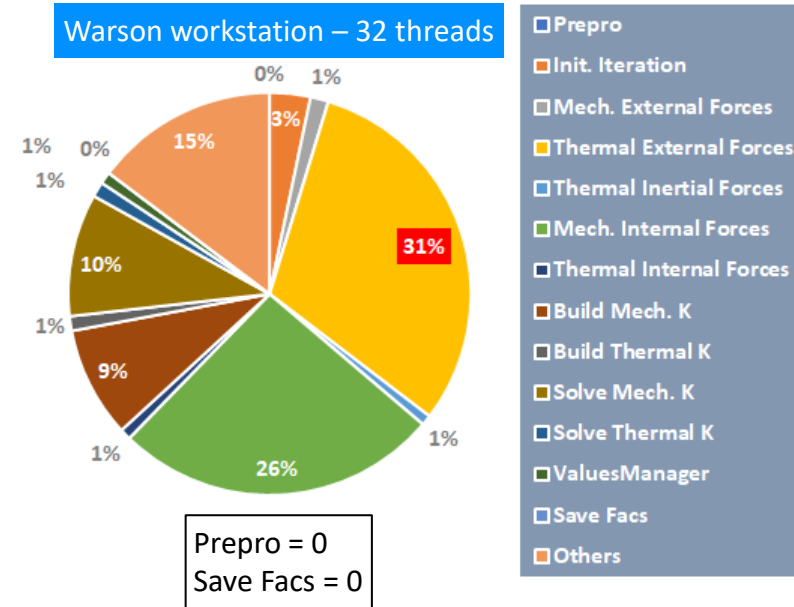


✓ Extra gain in wall-clock time: 13%.

- ✓ Significant improvement of the parallel scalability, except for thermal external forces due to the GIL.
- ✓ Total gain in wall-clock time without saving Facs: 41%. → Hoping until 58% when GIL effect will be removed...

- Improving the CPU time for the computation of the thermal external forces:

- Implementing director class using SWIG (PythonDirectorMultiParameterFunction):
 - SWIG_PYTHON_THREAD_BEGIN_BLOCK and SWIG_PYTHON_THREAD_END_BLOCK are present in the evaluate function of the generated code.
 - Adding decorator %nothreadblock for removing the lock does not work.
- Refactoring boundary elements: spatial part and time part could be made uncoupled in the Python function (product of a time function and a spatial function):
 - spatial part: evaluating and storing in a GPState0 once in the preprocessing instead of evaluating once per GP/element/thermal iteration,
 - time part: evaluating once per timestep using shortcuts instead of once per GP/element/thermal iteration.





Merci d'avoir choisi GDTECH / Merci pour votre attention



GDTECH
engineering

Nous contacter :
+32 (4) 367 87 11

Nous suivre :
www.gdtech.eu



Découvrir GDTech France
www.gdtech.fr